2001—2017 年开都 - 孔雀河流域植被物候特征及其对气候变化的响应①

杨秋萍[1,2]， 徐长春[1,2]， 张晋霞[1,2]， 罗映雪[1,2]， 陈 丽[1,2]

（1. 新疆大学资源与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；
2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘 要： 研究植被物候对气候因子变化的响应对于解析植被与气候的复杂关系至关重要。本文以开都 - 孔雀河流域为例，基于 2001—2017 年 MOD13Q1 数据，结合气温、降水和日照时数，探索流域内植被物候时空变化特征及其对海拔、气候要素变化的响应。结果表明：① 流域植物生长季始期（SOS）主要集中在第 90 ~ 150 d，生长季末期（EOS）主要集中在第 270 ~ 315 d，生长季长度（DOS）主要集中在 120 ~ 220 d。随海拔升高，整体上植物 SOS 呈推迟趋势、EOS 呈提前趋势、DOS 呈缩短趋势。② 近 17 a 研究区植物 SOS、EOS 均主要呈提前趋势，提前像元面积分别占研究区植被总面积的 60.81% 和 61.83%，DOS 主要呈缩短趋势，占比为 52.11%。③ 4 月气温对植物 SOS（负相关）提前影响较大；对植物 EOS 提前变化影响较大的因素是 6 月降水（负相关）和 11 月气温（正相关）；6 月降水对植物 DOS（负相关）缩短变化影响最大。总体上植被生长季始期主要受气温因素的影响，植被生长季末期和生长季长度主要受降水的影响。

关键词： 物候；NDVI；气候因子；开都 - 孔雀河流域；新疆

在过去的 100 a 里，全球变暖趋势明显，平均地表温度上升 0.74 ℃，而近 50 a 来温度上升速率更是达到 0.13 ℃ · $(10a)^{-1}$[1]，中国气温上升了 0.4 ~ 0.5 ℃，西北气温的上升幅度更是大于全国平均水平[2]。气候变暖会加速植物生长、缩短生育期并使产量减少，相关研究指出，气温的升高尤其是春季平均气温的上升对冬小麦抽穗与开花期有显著影响，德国、澳大利亚、阿根廷和美国大平原等地冬小麦的抽穗和开花期均有所提前，导致作物生育期提前[3-6]。也有研究表明，春季物候期平均提早 0.38 d · a^{-1}，秋季物候期平均延迟 0.45 d · a^{-1}，生长季长度延长 0.8 d · a^{-1}[7]。在干旱和半干旱地区，植被物候首先由可利用水控制，即使在水分充足的地区，降水也会影响植被物候[8-11]。此外，光照对物候变化亦有重要影响[12-13]，一些物种的物候期主要受光周期条件控制，而气温只是在植物满足临界日照时间长度后对其生长起到一定调节作用[14]。植被物候是表征植被—气候相互变化关系的重要指标之一[15-16]，它对气候波动异常敏感，可直接或间接体现气候变化状况，是气候变化研究不可或缺的指标之一[17]。

当前，由于传统物候观测资料有限，相关研究较为稀少[18]。但伴随遥感技术的普及，采用遥感提取物候参数这一方法受到普遍关注[19-23]，它基于传感器得到植被绿度信息，虽然与传统意义上的植被物候期如出苗、叶片蔓延、抽穗和开花时间等不完全一致，但却能在宏观层面上反映植被物候关键信息的相对状况[24]。遥感物候常用的 3 种参数为：生长季始期（SOS，start of growing season）、生长季末期（EOS，end of growing season）和生长季长度（DOS，EOS 和 SOS 之差，duration of growing season）。SOS、EOS 和 DOS 对环境因素和生态系统过程有强烈的响应，如能量交换、水温循环和碳吸收[25]，因此通常用于监测植被物候并评估环境对植被物候的影响。

开都 - 孔雀河流域是干旱区内陆河塔里木河的重要"一干"，是生态环境的脆弱区和气候变化响应的敏感区[26]。近年来受全球气候变化影响显著，区内气候、植被、水文响应较为明显[27-39]。那么，在西

① **收稿日期：** 2019 - 08 - 16； **修订日期：** 2019 - 10 - 27
基金项目： 国家自然科学基金项目"基于水资源变化的干旱内陆区典型流域绿洲适宜规模研究"（41561023）资助
作者简介： 杨秋萍（1994 - ），女，硕士研究生，主要研究方向为水资源开发利用. E-mail：yqp_0815@163.com
通讯作者： 徐长春. E-mail：xcc0110@163.com

北干旱区大幅升温的情况下[2]，近 20 a 开都－孔雀河流域植被物候期有怎样的变化？植被物候对气候变化的响应关系如何？各气候因子对植被 SOS、EOS 和 DOS 影响的贡献率是多少？影响研究区植被物候变化的主导气候因子又是什么？为了解决这些问题，本文采用 2001—2017 年空间分辨率 250 m 的 MOD13Q1 归一化植被指数数据（normalized difference vegetation index，NDVI），利用 Savitzky-Golay（S-G）滤波法和动态阈值法提取开都－孔雀河流域植被物候参数，结合同期月值平均气温、降水量和日照时数，研究近 20 a 开都－孔雀河流域植被物候特征及其对气候要素变化的响应，以期为西北干旱区植被物候变化规律研究以及干旱区植被生态系统恢复和保护提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

开都－孔雀河流域（图 1）包括开都河流域、博斯腾湖、孔雀河流域和诸小河流区。地处我国新疆巴音郭楞蒙古自治州境内，包括和静县、和硕县、焉耆县、博湖县、库尔勒市以及尉犁县的部分地区。因深居欧亚大陆腹地，远离海洋，且紧邻塔克拉玛干沙漠，气候总体表现为干旱少雨、蒸发强烈、昼夜温差大、日照充足、光照强等，属典型的温带大陆性干旱气候[40]。流域地形自西北向东南逐渐倾斜，降水和气温则随之减少和增加。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 *数据来源* MODIS 数据：来源于美国国家航空航天局（NASA），包括轨道号为：h24v04、h24v05、h25v04 和 h25v05；① 2001—2017 年归一化植被指数（NDVI）－MOD13Q1 数据集，空间分辨率 250 m，时间分辨率 16 d；② 2001—2017 年 MCD12Q1 数据集，属 MODIS Terra + Aqua 3 级土地覆盖类型产品，空间分辨率 500 m，其中包括 5 种不同的土地覆盖分类方案，本文采用的是 IGBP（国际地圈生物圈计划）的全球植被分类方案（表 1）。

气象数据：来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn/），包括新疆境内 49 个气象站点 2001—2017 年的逐日平均气温、降水量和日照时数，主要用于插值得到气象因子格点数据并分析其与不同植被物候参数的相互关系。

1.2.2 *数据预处理* 首先使用 MRT（MODIS reprojection tool）工具对 MODIS 数据进行投影和格式转换、图像拼接等处理；继而使用 ArcGIS 中的 Python 对拼接后的影像进行批量裁剪，得到流域范围内的 MODIS 产品；最后按 IGBP 全球植被分类方案提取相应植被覆盖类型，拼接并提取 MOD13Q1 数据。

1.3 研究方法

1.3.1 *植被物候提取* 先通过 Savitzky-Golay（S-G）滤波对 2001—2017 年开都－孔雀河流域内植物生长区的 MOD13Q1 影像进行平滑处理，再运用 TIMESAT 软件中动态阈值法提取近 17 a 的植被物候参数 SOS、EOS 和 DOS。

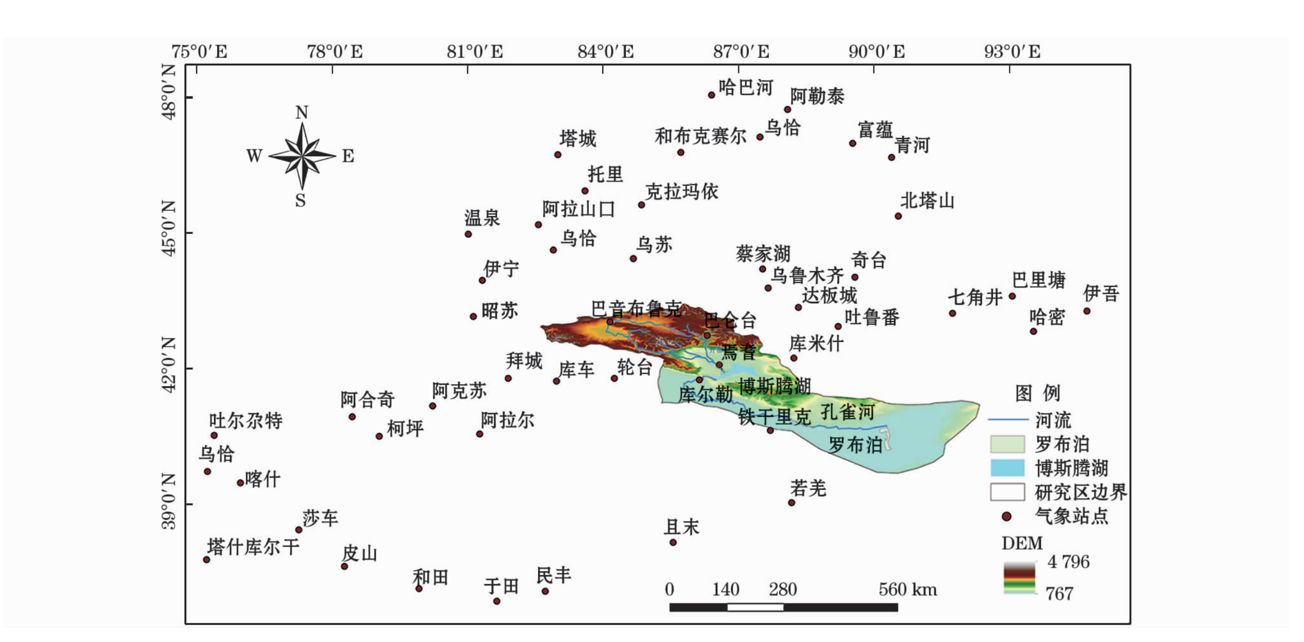


图 1 研究区及气象站点分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area and meteorological stations

表 1　MCD12Q1－IGBP 分类类型

Tab. 1　MCD12Q1 International Geosphere-Biosphere Programme(IGBP) legend and class descriptions

像元亮度值	地表覆盖类型	像元亮度值	地表覆盖类型
1	常绿针叶林	10	草地
2	常绿阔叶林	11	永久湿地
3	落叶针叶林	12	耕地
4	落叶阔叶林	13	城市和建筑区
5	混交林	14	农用地/自然植被拼接
6	稠密灌丛	15	雪和冰
7	稀疏灌丛	16	荒漠或稀疏植被
8	木本热带稀树草原	17	水体
9	热带稀树草原	255	未分类

1.3.2　气象数据插值　先将 2001—2017 年逐日平均气温和日照时数求平均、降水量求和,分别得到其月值数据。再选用 ANUSPLIN 方法[41－42],以经纬度和高程为协变量,对各气象因子的月值数据进行插值,获得空间分辨率为 1 km 的插值结果。最后,提取研究区植物生长范围内的插值数据。

对所选 49 个站点,其中 45 个用于空间插值,其余 4 个(巴伦台、巴音布鲁克、库尔勒与焉耆站)用于数据校验。验证时,使用平均相对误差(MAE)和 Pearson 相关系数评估实际值与拟合值的精度差异。验证结果显示,4 个站点年均气温和日照时数的插值结果与真实值的相关系数平均值分别为 0.989 5 和 0.854 8,有明显的线性相关关系($P=0.01$)。同时,平均相对误差分别为 0.694 6 和 0.156 4,偏差较小。相比较,降水的插值效果要比气温和日照时数略差,相关系数为 0.780 5($P=0.01$),平均相对误差为 3.697 7。降水插值效果稍差的原因可能是降水并非像气温和日照一样具有明显的地带性,加之受下垫面因子如地形、坡向等影响,空间变异性较大,导致插值效果降低,但误差仍在可接受范围内。

1.3.3　趋势和相关性分析

(1) 趋势分析[43]

采用一元线性趋势分析法来分析物候时间序列的变化趋势。公式如下:

$$\text{Slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times y)-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}y}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2}\qquad(1)$$

式中:Slope 为趋势线的斜率,即变化趋势,斜率为正值表示植物生长季始期和末期推后、生长季增长;负值则表示生长季始期和末期提前、生长季缩短。y 为某栅格第 i 年的物候期参数;i 为年变量,取值范围 1－n。选择 0.1、0.05 和 0.01 作为显著性水平对物候期的变化趋势进行显著性检验。

(2) 相关分析[44]

用 Pearson 相关系数来度量植被物候和气象数据在月尺度上的相关程度。公式为:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}\qquad(2)$$

式中:x_i 和 y_i 表示第 i 年的气候和植被物候数据。r 的绝对值越大,说明气候指标对物候期的影响越大,反之则影响较小。正相关关系表明:气象因子趋势增加/升高,SOS 和 EOS 推迟,DOS 延长;负相关关系则反之。

1.3.4　设置采样点　相关研究结果表明,植被物候与不同海拔间存在明显分异规律[45]。在地形起伏较大的上游山区选择采样点能够较好地揭示植被物候随海拔分布的变化规律。运用 ArcGIS 软件在山区随机选取 215 个样点(图 2),提取每个样点对应像元的 DEM 以及 2001—2017 年的平均 SOS、EOS、DOS,并通过线性拟合来探究植被物候与海拔之间的相互关系。由图 2 可知,研究区植被主要分布在开都河和孔雀河上游地区,孔雀河中下游植被分布稀疏。为了能更好地显示区域植被变化,图 3～8 中只显示开都河和孔雀河上游植被分布状况。

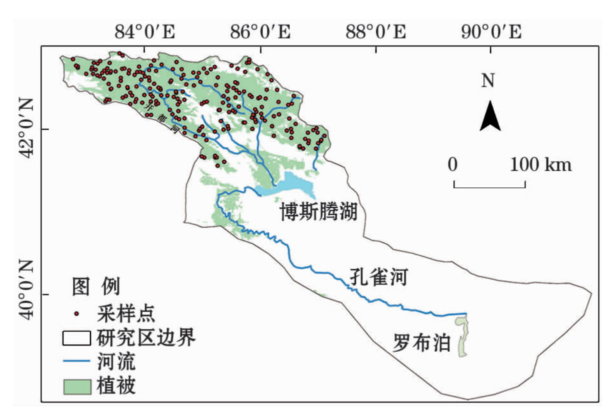


图 2　开都－孔雀河流域植被及采样点空间分布示意图

Fig. 2　Spatial distribution of vegetation and sampling point in Kaidu-Kongqi River Basin

2　结果与分析

2.1　植被物候期的多年平均及其与海拔的关系

由图 3a 可知,研究区植被生长季始期 SOS 多

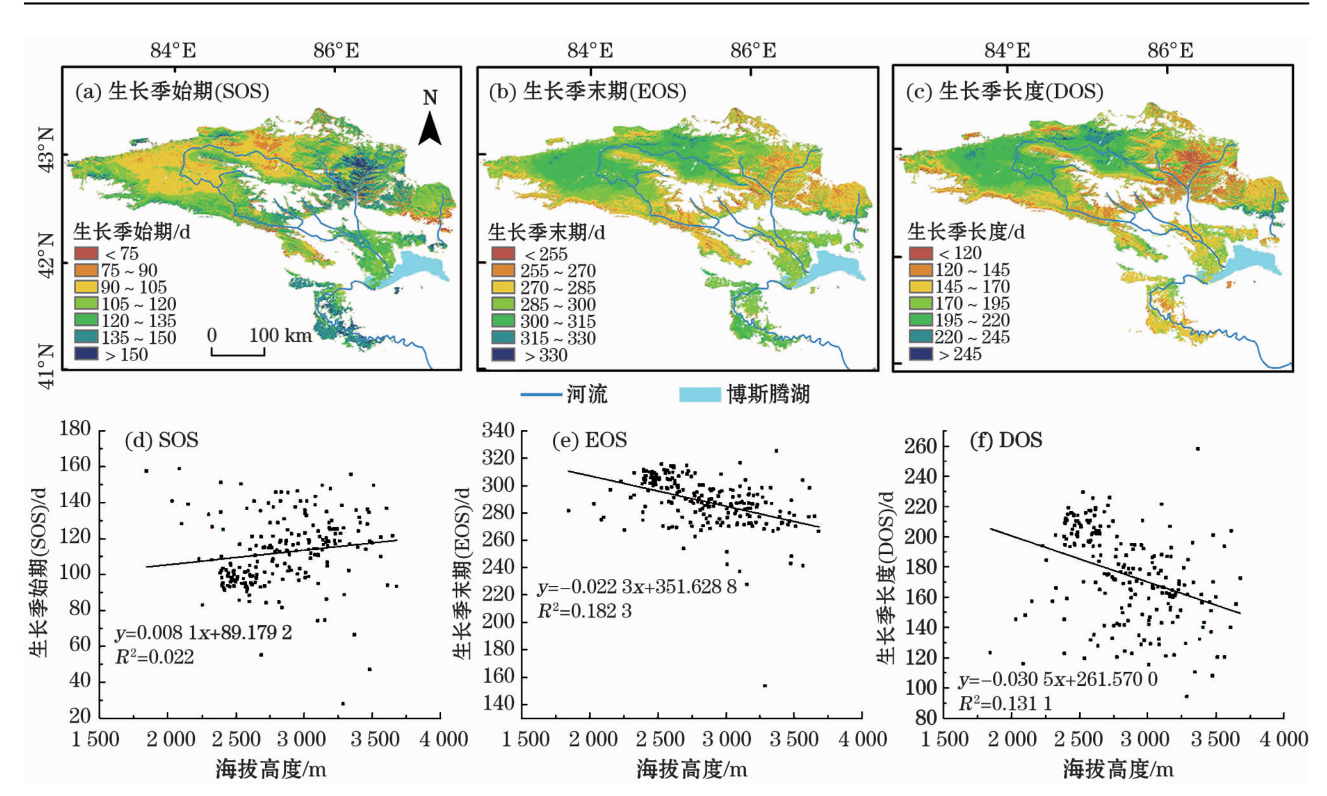


图3　2001—2017年开都—孔雀河流域植被物候期多年平均值空间分布及其与海拔高度的关系

Fig. 3　Spatial distribution of multi-annual mean vegetation phenology and its relationship with altitude in the Kaidu-Kongqi River basin during 2001 – 2017

集中于第90～150 d,即3月下旬至5月下旬。其空间分布表现为:巴音布鲁克草原SOS多为第90～105 d,山区东南部多迟于150 d,其余山区部分主要为第105～120 d,开都河绿洲主要为第105～120 d,孔雀河绿洲则多为第135～150 d。虽然,两绿洲区植被主要为农作物,但因种植结构不同,开都河绿洲主要种植玉米和小麦,孔雀河绿洲主要种植香梨和棉花,故二者SOS表现并不一致。SOS除在水平方向上呈现一定变化规律外,在垂直方向上也体现一定的地带性分布特征(图3d),表现为海拔每升高100 m,SOS推迟0.81 d,这与相关学者对新疆的研究结果"海拔每升高100 m,SOS推迟0.89 d"[45]相接近。

植物生长季末期EOS多集中于第270～315 d,即9月底至11月上旬(图3b),其中巴音布鲁克草原多集中于第285～315 d,除巴音布鲁克外山区主要为第255～285 d,开都河绿洲主要为第270～300 d,孔雀河绿洲多为第285～315 d,在水平空间上EOS并没有如SOS表现出一定的梯度变化。在垂直方向上(图3e),海拔每升高100 m,EOS提前2.23 d,长于全疆"提前0.66 d"[45]水平。

植物生长季长度DOS多集中于120～220 d。其中,巴音布鲁克主要集中在170～220 d,山区与东南山间多小于170 d,开都河绿洲和孔雀河绿洲DOS一致,主要集中在145～195 d。研究区植被DOS在水平方向上总体表现为草地生长期最长,农作物次之,山间林地最短;在垂直方向上,海拔每升高100 m,DOS缩短3.05 d(图3f),长于全疆"缩短1.55 d"[45]水平。

2.2　植被物候期的年际变化趋势及其空间分布

研究区植被SOS和EOS主要呈提前趋势,DOS呈缩短趋势(图4)。SOS(图4a)变化趋势平均值为 $-3\ d\cdot(10a)^{-1}$,其中山区、开都河绿洲和孔雀河绿洲平均变化趋势分别为 $-3.9\ d\cdot(10a)^{-1}$、$0.1\ d\cdot(10a)^{-1}$ 和 $4.2\ d\cdot(10a)^{-1}$。SOS提前的面积占植被总面积的60.81%,其中显著($P<0.05$)提前的面积比为10.40%。EOS(图4b)变化斜率平均值为 $-2.4\ d\cdot(10a)^{-1}$,山区、开都河绿洲和孔雀河绿洲变化趋势分别为 $-2.8\ d\cdot(10a)^{-1}$、$-3.5\ d\cdot(10a)^{-1}$ 和 $3.2\ d\cdot(10a)^{-1}$。EOS提前的面积占植被面积的61.83%,其中呈显著($P<0.05$)提前的面积比为12.88%。DOS(图4c)变化趋势平均值为 $0.4\ d\cdot(10a)^{-1}$,其中山区、开都河绿洲和孔雀河绿洲变化趋势分别为 $1\ d\cdot(10a)^{-1}$、$-3.5\ d\cdot(10a)^{-1}$

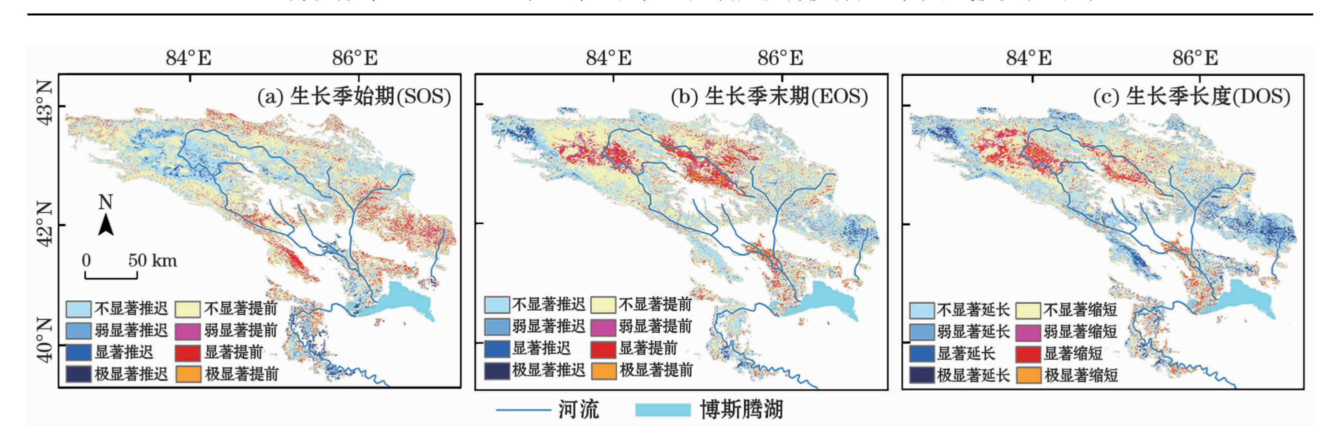


图 4 2001—2017 年开都 - 孔雀河流域植被物候期年际变化空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of interannual variation of vegetation phenology in Kaidu-Kongqi River basin from 2001 to 2017

和 $-1.2\ \mathrm{d}\cdot(10\mathrm{a})^{-1}$。但 DOS 表现为缩短的面积比更大,为 52.11%。且从显著性来看,DOS 呈缩短比延长更显著。因此,DOS 整体上呈缩短趋势。

2.3 植被物候期对气候因子变化的响应

2.3.1 植被物候期与气候因子的时间变化 从图 5 可知,2001—2017 年,年均气温呈波动式下降;年平均日照时数呈波动上升;年降水量除 2016 年异常多外,其他时间较为稳定,呈波动式变化,波动幅度较大,但无明显趋势(图 5a)。3 个主要物候期参数都呈波动式变化,且较稳定,无明显趋势。将 2010 年与 2016 年相比较,可以看出降水量增加,生长季始期提前、生长季长度延长、生长季末期无显著变化。从图 5a 中可以看出,植被物候与气候因子年值变化之间的响应不是很显著。近 17 a 内,月降水量除 1 月、7 月和 9 月呈减少趋势外,其余月份均呈增加趋势,其中 7 月减少最多,4—6 月增加最多;月平均气温除了 4 月、7 月呈上升趋势外,其余月份(5 月除外)均呈下降趋势;月平均日照时数除 6 月缩短外,其余月份均呈延长趋势,特别是冬春季和秋季延长明显。

2.3.2 植被物候期对单一气候因子的响应 首先对上年 10—12 月和翌年 1—5 月的降水、气温和日照时数与 SOS 进行相关分析与显著性检验(图 6)。在气温方面,上年 11 月至翌年 2 月气温与 SOS 呈正相关,虽这一时期气温呈下降趋势,但降水有所增加(图 5b),有利于土壤保墒,促进植被返青,SOS 提前。在降水方面,11 月至翌年 1 月、5 月降水和 SOS 主要呈负相关,这几个月降水均呈增加趋势(图 5b),即 SOS 提前;其余月份主要呈正相关。在日照时数方面,各月日照时数与 SOS 主要呈负相关关系,即在日照时数增加的情况下(图 5b),SOS 有所提前。从显著性水平来看,植被 SOS 与 4 月气温呈负相关区域面积占比最大,为 77.37%,其中呈显著($P<0.05$,下同)负相关的面积为 23.41%,气温呈增加趋势(图 5b),SOS 提前,主要分布于山区和开都河绿洲。

其次,由于 EOS 主要受控于当年夏季和秋季气候状况,因此,本文主要对当年6—11月的降水、气

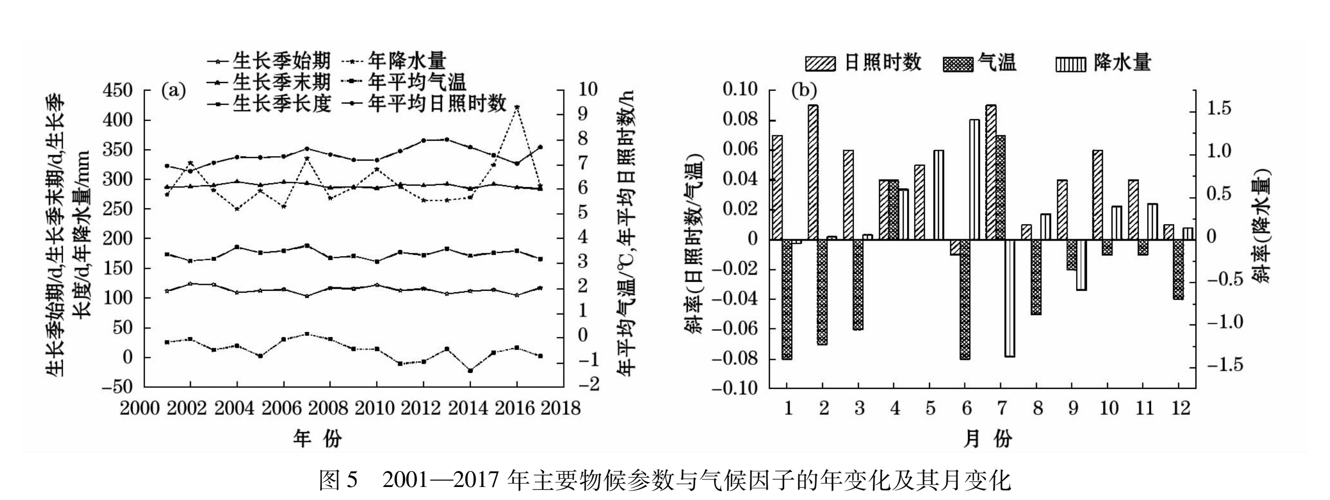


图 5 2001—2017 年主要物候参数与气候因子的年变化及其月变化

Fig. 5 Changes in the annual main phenological parameters and climatic factors and the monthly values from 2001 to 2017

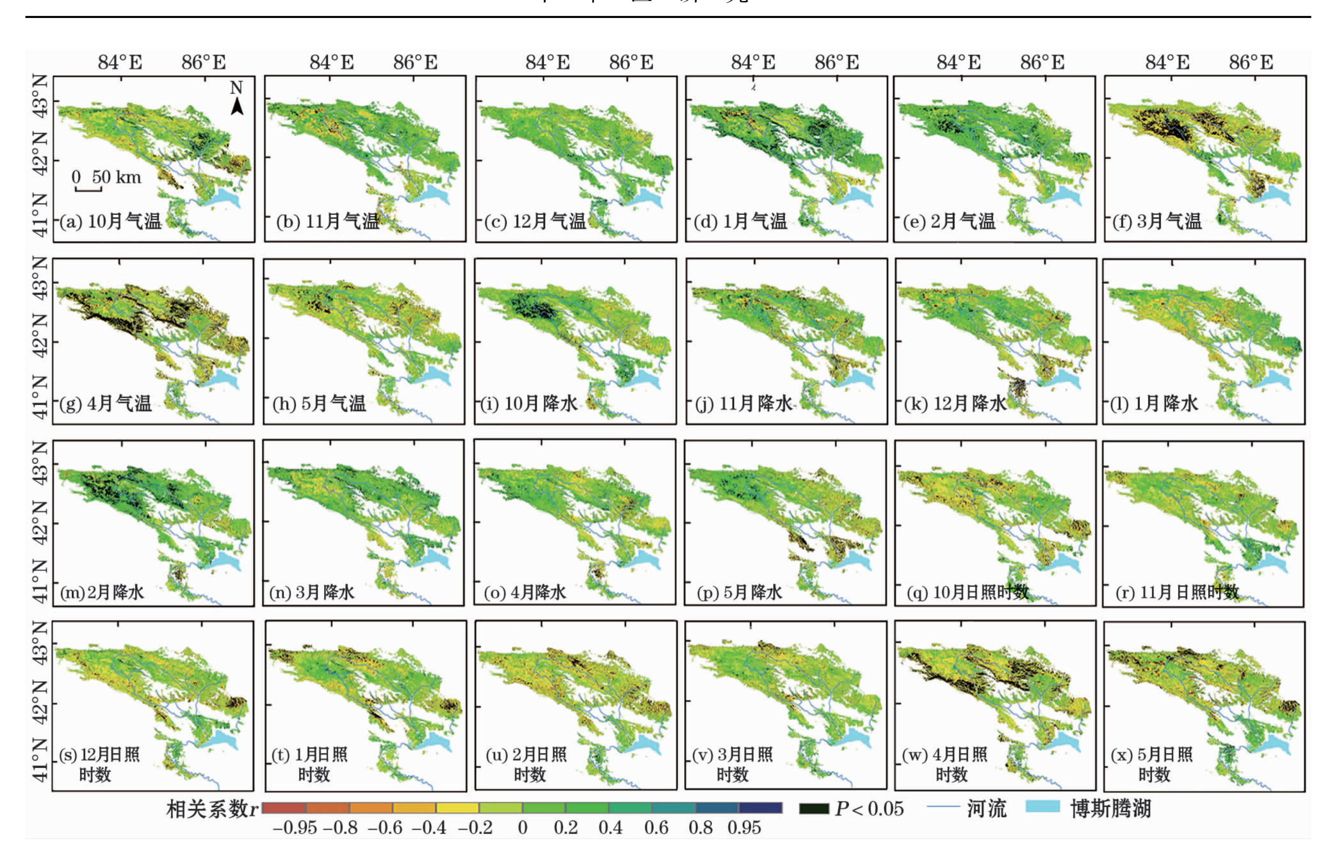


图6 开都－孔雀河流域植被 SOS 与10月至翌年5月气象因子的相关系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficients between SOS and October-May climatic factors on in Kaidu-Kongqi River basin

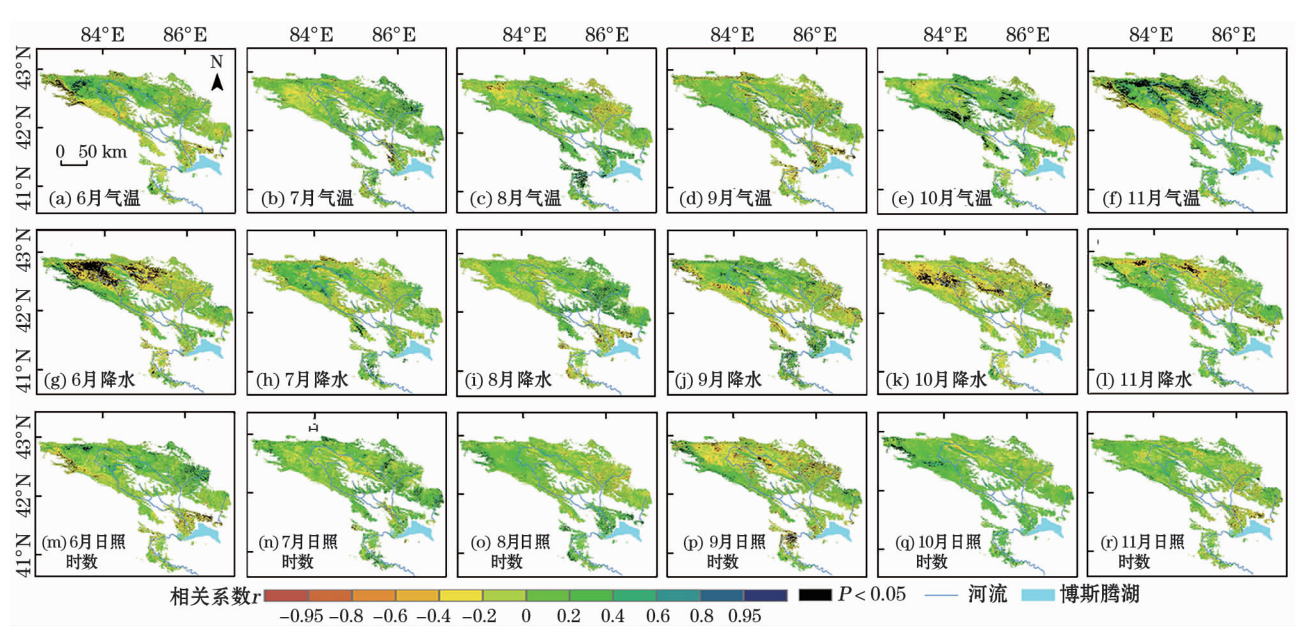


图7 开都－孔雀河流域植被 EOS 与6—11月气象因子的相关系数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of correlation coefficients between SOS and June-November climatic factors on in Kaidu-Kongqi River basin

温和日照时数与 EOS 进行相关分析及显著性检验(图7)。在气温方面,除6月、9月和12月正负相关的面积差距不大外,其余各月气温与 EOS 主要呈正相关关系,即在气温降低的情况下(图5b),EOS 提前。在降水方面,6月和10月降水与 EOS 主要呈负相关关系。负相关关系意味着在降水增加的情况下(图5b),EOS 会有所提前。其余月份正负相关的面积比差距不大。在日照时数方面,除9月份外,其余各月日照时数和 EOS 主要呈正相关关系,9月日照时数增加与6月日照时数减少(图5b),EOS提前。

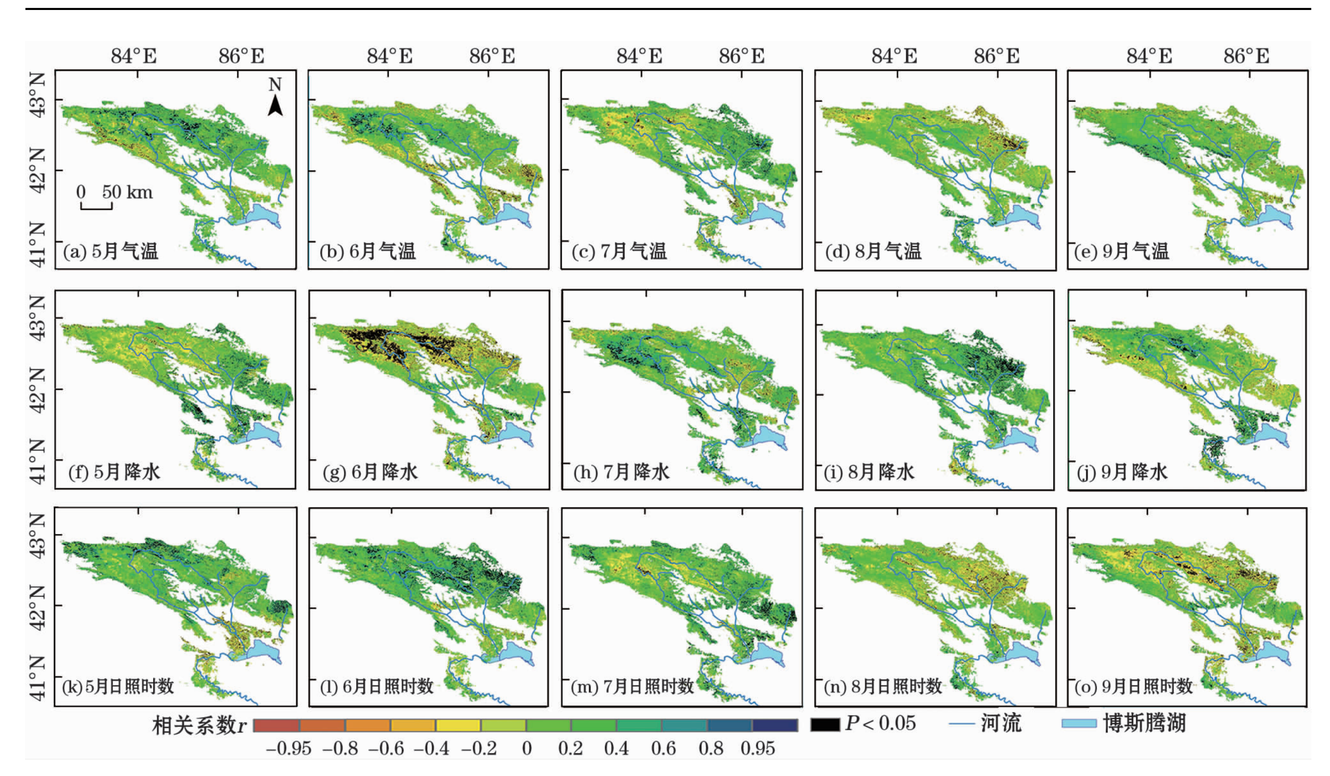


图 8 开都－孔雀河流域植被 DOS 与 5—9 月气象因子的相关系数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of correlation coefficients between DOS and May-September climatic factors on in Kaidu-Kongqi River basin

从显著性水平来看,6 月降水与植被 EOS 呈负相关的面积为 63. 62%,其中呈显著负相关的面积为 15.88%,6 月降水呈增加趋势(图 5b),EOS 提前,主要分布于巴音布鲁克草原。

以上述影响 SOS 和 EOS 的主要气候因子为基础,且生长季长度主要集中在夏季,所以选择当年 5—9 月的降水、气温和日照时数与植被 DOS 做相关分析及显著性检验(图 8)。在气温方面,5 月、7 月和 9 月气温与生长季长度主要呈正相关,其余月份整体上呈负相关。在降水方面,5 月、6 月和 9 月降水与 DOS 主要呈负相关。在日照时数方面,5—7 月日照时数与 DOS 主要呈正相关,其余月份主要呈负相关。从显著性水平来看,6 月降水与植被 DOS 呈负相关的面积占研究区植被总面积的 70. 61%,其中呈显著负相关的面积为 19.70%,6 月降水呈增加趋势(图 5b),DOS 缩短,主要分布于巴音布鲁克草原。

2.3.3 植被物候期对气候因子的综合响应 尽管各物候指标都受特定气象因子在特定时期的影响,但植被物候的变化却是各气象因子共同影响的结果。开展气候因子对物候影响的 R^2 分析(表 2),结果表明:2 月降水、3—4 月气温、4 月日照时数对植被 SOS 影响较大,其分别决定植被 SOS 变化的 10%、12% 和 10%。对植被 EOS 变化影响较大的因素主要是 6 月降水和 11 月气温,二者分别决定植被 EOS 变化的 9%。对植被 DOS 变化影响最大的是 6

表 2 开都－孔雀河流域气候因子对物候影响的 R^2 分析结果

Tab. 2 R^2 analysis of effects of climatic factors on phenological in Kaidu-Kongqi River basin

物候	月份	气温	降水	日照时数
SOS	10	0. 07	0. 07	0. 07
	11	0. 07	0. 07	0. 06
	12	0. 05	0. 09	0. 06
	1	0. 09	0. 08	0. 07
	2	0. 07	0. 10	0. 08
	3	0. 11	0. 07	0. 05
	4	0. 13	0. 06	0. 10
	5	0. 06	0. 07	0. 08
EOS	6	0. 07	0. 09	0. 06
	7	0. 06	0. 06	0. 05
	8	0. 06	0. 06	0. 05
	9	0. 05	0. 07	0. 07
	10	0. 06	0. 08	0. 05
	11	0. 09	0. 07	0. 05
DOS	5	0. 06	0. 06	0. 08
	6	0. 07	0. 11	0. 08
	7	0. 06	0. 07	0. 07
	8	0. 05	0. 07	0. 06
	9	0. 05	0. 07	0. 07

月降水量,为11%。其余月份各气象因子对植被物候变化的影响较弱。气象因子对SOS、EOS和DOS的解释能力依次为:气温>降水>日照时数、降水>气温>日照时数、降水>日照时数>气温。综合而言,植被的生长季始期主要受气温因素的影响,植被的生长季末期和生长季长度主要受降水的影响。

3 结 论

(1) 开都-孔雀河流域植物生长季始期主要集中在第90~150 d,生长季末期主要集中在第270~315 d,生长季长度主要集中在120~220 d。海拔对于植被物候特征的影响为:海拔每升高100 m,SOS推迟0.81 d,EOS提前2.23 d,DOS缩短3.05 d。

(2) 2001—2017年研究区植被SOS和EOS主要呈提前趋势,提前区面积占研究区植被总面积的60.81%和61.83%;DOS主要呈缩短趋势,生长季长度缩短区面积占比为52.11%。

(3) 4月气温对植被SOS影响较大(负相关),可决定植被SOS变化的13%,气温升高,SOS提前;对植被EOS变化影响较大的因素是6月降水(负相关)和11月气温(正相关),二者都决定植被EOS变化的9%,6月降水增加和11月气温降低均导致EOS提前;6月降水对植被DOS变化影响最大(负相关),可决定植被DOS变化的11%,降水增加,DOS缩短。由此,决定流域植被物候变化的气象要素主要是4月气温、6月降水和11月气温。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate change 2013:The Physical Science Basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2013.

[2] Yatagai A,Yasunari T. Interannual variations of summer precipitation in the arid/semi-arid regions in China and Mongolia:Their regionality and relation to the Asian summer monsoon[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,1995,73:909-923.

[3] Sadras V O,Monzon J P. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends:Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina[J]. Field Crops Research,2006,99(2):136-146.

[4] Hu Q,Weiss A,Song F,et al. Earlier winter wheat heading dates and warmer spring in the U. S. Great Plains [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2005,135(1):284-290.

[5] Eyshi Rezaei E,Siebert S,Ewert F. Intensity of heat stress in winter wheat-phenology compensates for the adverse effect of global warming[J]. Environmental Research Letters,2015,10(2):doi:10.1088/1748-9326/10/2/024012.

[6] Chmielewski F M,Müller A,Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany,1961-2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2004,121(1):69-78.

[7] Julien Y,Sobrino J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database[J]. International Journal of Remote Sensing,2009,30(13):3495-3513.

[8] Reich P B. Phenology of tropical forest:Patterns,causes,and consequences[J]. Canadian Journal of Botany,1995,73(2):164-174.

[9] Justiniano M J,Fredericksen T S. Phenology of tree species in Bolivian dry forests[J]. Biotropica,2000,32(2):276-281.

[10] Kramer K,Leinonen I,Loustau D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal,temperate and Mediterranean forest ecosystems:An overview[J]. International Journal of Biometeorology,2000,44(2):67-75.

[11] 高亚敏. 气候因素对科尔沁草地北部牧草生长发育的影响[J]. 干旱区研究,2019,36(2):412-419.[Gao Yamin. Effects of climatic factors on herbage growth in the North Horqin grassland[J]. Arid Zone Research,2019,36(2):412-419.]

[12] Keller F,Körner C. The role of photoperiodism in alpine plant development[J]. Arctic Antarctic and Alpine Research,2003,35(3):361-368.

[13] Schaber J,Badeck F W. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany[J]. International Journal of Biometeorology,2003,47(4):193-201.

[14] Korner C,Basler D. Phenology under global warming[J]. Science,2010,327(5972):1461-1462.

[15] Barr A,Black T A,Mccaughey H. Climatic and phenological controls of the carbon and energy balances of three contrasting boreal forest ecosystems in Western Canada[J]. Tectonophysics,2009,126(1):31-55.

[16] Root T L,Price J T,Hall K R,et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature,2003,421(6918):57-60.

[17] 赵彦茜,肖登攀,柏会子,等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展[J]. 地理科学进展,2019,38(2):224-235.[Zhao Yanxi,Xiao Dengpan,Bai Huizi,et al. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China[J]. Progress in Geography,2019,38(2):224-235.]

[18] Piao S,Fang J,Zhou L,et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Global Change Biology,2006,12(4):672-685.

[19] 孔冬冬,张强,黄文琳,等. 1982-2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J]. 地理学报,2017,72(1):39-52.[Kong Dongdong,Zhang Qiang,Huang Wenlin,et al. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):39-52.]

[20] 郭少壮,白红英,黄晓月,等. 秦岭太白红杉林遥感物候提取及对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2019,38(4):1123-1132.[Guo Shaozhuang,Bai Hongying,Huang Xiaoyue,et al. Remote sensing phenology and response to climate change of *Larix*

chinensis forest in Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(4):1123 - 1132.]

[21] 张晓东,朱文博,张静静,等. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J]. 地理学报,2018,73(1):41 - 53. [Zhang Xiaodong,Zhu Wenbo,Zhang Jingjing,et al. Phenology of forest vegetation and its response to climate change in the Funiu Mountains [J]. Acta Geographica Sinica,2018,73(1):41 - 53.]

[22] 邓兴耀,姚俊强,刘志辉. 基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J]. 干旱区研究,2017,34(1):10 - 19. [Deng Xingyao,Yao Junqiang,Liu Zhihui. Spatiotemporal dynamic change of vegetation coverage in arid regions in Central Asia based on GIMMS NDVI[J]. Arid Zone Research,2017,34(1):10 - 19.]

[23] Shen M,Piao S,Dorji T,et al. Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau:Research status and challenges[J]. National Science Review,2015,2(4):454 - 467.

[24] 夏传福,李静,柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感学报,2013,17(1):1 - 16. [Xia Chuanfu,Li jing,Liu Qinhuo. Review of advances in vegetation phenology monitoring by remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing,2013,17(1):1 - 16.]

[25] Cleland E E,Chuine I,Menzel A,et al. Shifting plant phenology in response to global change[J]. Trends in Ecology & Evolution,2007,22(7):357 - 365.

[26] 汪菲,王长建. 基于相对资源承载力模型的区域可持续发展研究——以开都河 - 孔雀河为例[J]. 资源与产业,2017,19(1):108 - 115. [Wang Fei,Wang Changjian. Reglonal sustainable development based on relative resources carting capacity model:A case study on Kaidu River-Kongque River basin[J]. Resources & Industries,2017,19(1):108 - 115.]

[27] 丁之勇,葛拥晓,吉力力·阿不都外力. 北疆地区近 53 年极端气温事件及其影响因素分析[J]. 地球环境学报,2018,9(2):159 - 171. [Ding Zhiyong,Ge Yongxiao,Jilili Abuduwaili. Spatiotemporal variation characteristics of extreme temperature and its influencing factors in recent 53 years in Northern Xinjiang,China [J]. Journal of Earth Environment,2018,9(2):159 - 171.]

[28] 李佳秀,陈亚宁,刘志辉. 新疆不同气候区的气温和降水变化及其对地表水资源的影响[J]. 中国科学院大学学报,2018,35(3):370 - 381. [Li Jiaxiu,Chen Yaning,Liu Zhihui. Variation inthe temperature and precipitation and their influences on surface water resource in different climate zones of Xinjiang[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences,2018,35(3):370 - 381.]

[29] 陈颖,李维京,史红政,等. 北大西洋涛动对新疆冬季极端冷事件的影响[J]. 干旱区研究,2019,36(2):348 - 355. [Chen Ying,Li Weijing,Shi Hongzheng,et al. Effects of NAO on the extreme cold events in Xinjiang in Winter[J]. Arid Zone Research,2019,36(2):348 - 355.]

[30] 尼加提·伊米尔,满苏尔·沙比提,玉苏甫·买买提. 天山北坡植被 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系[J]. 干旱区研究,2019,36(5):1250 - 1260. [Nijiati Yimier,Mansur Shabiti,Yusufu Maimaiti. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its relationship with climatic factors on the Northern slope of the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research,2019,36(5):1250 - 1260.]

[31] 谢培,顾艳玲,张玉虎,等. 1961 - 2015 年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理,2017,40(2):332 - 339. [Xie Pei,Gu Yanling,Zhang Yuhu,et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961 - 2015[J]. Arid Land Geography,2017,40(2):332 - 339.]

[32] 高瑜莲,柳锦宝,柳维扬,等. 近 14 a 新疆南疆绿洲地区地表蒸散与干旱的时空变化特征研究[J]. 干旱区地理,2019,42(4):830 - 837. [Gao Yulian,Liu Jinbao,Liu Weiyang,et al. Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration and drought at the oasis area of the Southern Xinjiang in recent 14 years[J]. Arid Land Geography,2019,42(4):830 - 837.]

[33] 贾俊鹤,刘会玉,林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报,2019,39(14):5058 - 5069. [Jia Junhe,Liu Huiyu,Lin Zhenshan. Multi-time scale changes of vegetation NPP in six provinces of Northwest China and their responses to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(14):5058 - 5069.]

[34] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究,2003,23(2):152 - 164. [Shi Yafeng,Shen Yongping,Li Dongliang,et al. Discussion on the present climate change from warm-day to warm wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences,2003,23(2):152 - 164.]

[35] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土,2002,24(3):219 - 226. [Shi Yafeng,Shen Yongping,Hu Ruji. Preliminary study on signal,impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2002,24(3):219 - 226.]

[36] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响[J]. 干旱区地理,2002,25(3):194 - 200. [Hu Ruji,Jiang Fengqing,Wang Yajun,et al. A study on signals and effects of climatic pattern change from warm-day to warm-wet in Xinjiang [J]. Arid Land Geography,2002,25(3):194 - 200.]

[37] 郭继凯,吴秀芹,董贵华,等. 基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析[J]. 干旱区研究,2017,34(3):621 - 629. [Guo Jikai,Wu Xiuqin,Dong Guihua,et al. Vegetation coverage change and relative effects of driving factors based on MODIS/NDVI in the Tarim River Basin[J]. Arid Zone Research,2017,34(3):621 - 629.]

[38] 何金苹,徐长春,李晓菲,等. 开都—孔雀河流域 NDVI 动态变化及其与气温和降水的联系[J]. 水土保持研究,2018,25(6):329 - 415. [He jinping,Xu Changchun,Li Xiaofei,et al. Change trend of NDVI and its response to temperature and precipitation in long time series in Kaidu-Kongqi River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(6):329 - 415.]

[39] 高庆,艾里西尔·库尔班,肖昊. 巴音布鲁克地区植物物候时空动态变化及其驱动分析[J]. 干旱区研究,2018,35(6):1418 - 1426. [Gao Qing,Alishir Kurban,Xiao Hao. Spatiotemporal variation of vegetation phenology and its driving factors in the Bayanbuluk Region[J]. Arid Zone Research,2018,35(6):1418 - 1426.]

[40] 李晓菲,徐长春,李路,等. 21 世纪开都－孔雀河流域未来气候变化情景预估[J]. 干旱区研究,2019,36(3):556－566. [Li Xiaofei,Xu Changchun,Li Lu,et al. Projection of future climate change in the Kaidu-Kongqi River Basin in the 21st Century[J]. Arid Zone Research,2019,36(3):556－566.]

[41] 刘志红,Li Lingtao,McVicar Tim R,等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象,2008,34(2):92－100. [Liu Zhihong,Li Lingtao,Mc Vicar T R,et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLINN[J]. Meteorological Monthly,2008,34(2):92－100.]

[42] 于飞,郑小波,谷晓平,等. 复杂山地环境下气候要素空间插值精度比较研究[J]. 贵州气象,2008,32(3):3－6. [Yu Fei,Zheng Xiaobo,Gu Xiaoping,et al. Comparative study on spatial interpolation of climate elements precision in complex mountainous environment[J]. Journal of Guizhou Meteorology,2008,32(3):3－6.]

[43] 玛地尼亚提·地里夏提,玉素甫江·如素力,姜红. 2001—2014 年博斯腾湖流域植被物候时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报,2018,38(19):6921－6931. [Madiniyati Dilixiati,Yusufujiang Rusuli,Jiang Hong. Temporal and spatial variation of vegetation phenology and its driving factor analysis in the Bosten Lake Drainage Basin from 2001 to 2014[J]. Acta Geographica Sinica,2018,38(19):6921－6931.]

[44] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2014:47－59. [Xu Jianhua. Quantitative Geography[M]. Beijing:Higher Education Press,2014:47－59.]

[45] 何宝忠,丁建丽,李焕,等. 新疆植被物候时空变化特征[J]. 生态学报,2018,38(6):2139－2155. [He Baozhong,Ding Jianli,Li Huan,et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang from 2001 to 2016[J]. Acta Geographica Sinica,2018,38(6):2139－2155.]

Phenological characteristics of vegetation and its response to climatic change in the Kaidu-Kongqi River basin, Xinjiang, during 2001－2017

YANG Qiu-ping[1,2], XU Chang-chun[1,2], ZHANG Jin-xia[1,2], LUO Ying-xue[1,2], CHEN Li[1,2]

(1. *College of Resource and Environment Sciences*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *Xinjiang*, *China*;
2. *MOE Key Laboratory of Oasis Ecology*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: Studying the response of vegetation phenology to climatic factors is vital for understanding relationships between vegetation and climate. Based on MODIS normalized vegetation index (NDVI) data between 2001 and 2017, phenological parameters of vegetation in the Kaidu-Kongqi River basin were extracted according to the Savitzky-Golay (S-G) filtering and dynamic threshold method. Combined with average temperature, precipitation, and sunshine data, the temporal and spatial characteristics of vegetation phenology and its response to elevation and climate change was studied using trend analysis, ANUSPLIN interpolation and correlation analysis. The following conclusions could be drawn from the results: (1) The start of growing season (SOS) in the basin is mainly from the 90th to 150th days, and the end of vegetation growing season (EOS) is mainly from the 270th to 315th days. The duration of growing season (DOS) is predominantly concentrated on the $120^{th}－220^{th}$ days. Vegetation phenology is affected by elevation such that, with an elevation increase of 100 m, the SOS is delayed by 0.81 days, the EOS is advanced by 2.23 days, and the DOS is shortened by 3.05 days. (2) According to annual variations in phenology within the basin in recent 17 years, both SOS and EOS were mainly in advance, and the area of the advanced pixels accounted for 60.81% and 61.83% of the total vegetation area in the study area, respectively. The DOS maily showed a shortening trend, accounting for 52.11%. (3) The temperature in April has a great negative influence on the timing of the SOS, determining 13% of total SOS change. April temperatures have an increasing trend, resulting in earlier SOS timing. The major factors affecting EOS change are precipitation in June (negatively) and temperature in November (positively), both of which determine 9% of the total EOS change. then the precipitation in June is increased and temperatures in are November decreased, the EOS occurs earlier. Precipitation in June has a negative impact on DOS and can explain 11% of total DOS change. With increases in precipitation in June, DOS is decreased. The overall conclusions of this work are as follows: vegetation greening is primarily affected by temperature, whereas vegetation growth and withered yellow vegetation periods are mainly influenced by precipitation.

Key words: phenology; NDVI; climatic factors; Kaidu-Kongqi River basin; Xinjiang